

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Vylehčené zemní konstrukce  
Lightweight Filling Materials for Soil Constructions

Student:

Tomáš Hrnčiar

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D.

Ostrava 2015

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

## **Anotace**

HRNČIAR, Tomáš. *Vylehčené zemní konstrukce*. Ostrava, 2015. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D. Bakalářská práce se zabývá materiály používanými do vylehčených zemních konstrukcí s důrazem na využití nestandardních materiálů. Jednotlivé materiály jsou charakterizovány s popisem jejich využití a aplikace. Praktická část práce je zaměřená na modelování v geotechnickém softwaru GEO5. Výsledky jsou vyhodnoceny a porovnány s ručním výpočtem. Bakalářská práce obsahuje 50 stran.

## **Klíčová slova**

Vylehčená zemní konstrukce, pěnové sklo, polystyren, balíky z pneumatik, keramické kamenivo, popílek, geotechnický software GEO5

## **Annotation**

HRNČIAR, Tomáš. *Lightweight filling materials for soil constructions*. Ostrava, 2015. Bachelor thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Geotechnics and Underground Engineering. Leading works Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D. This thesis deals with the lightweight materials used in lightweight soil constructions with emphasis on the use of non-standard materials. The materials are characterized by a description of their use and application. The practical part of this thesis is focused on modeling in geotechnical software GEO5. The results are evaluated and compared with manual calculation. This thesis contains 50 pages.

## **Key words**

Lightweight soil construction, glass foam, geofom, tyre bales, ceramic aggregate, fly ash, geotechnical software GEO5

## Obsah

Úvod.....	6
1 Definice vylehčených zemních konstrukcí, oblast použití .....	7
2 Materiály používané do vylehčených zemních konstrukcí, specifikace těchto materiálů, možnosti použití .....	8
2.1 Keramické kamenivo .....	10
2.1.1 Specifikace materiálu.....	11
2.1.2 Možnosti použití .....	14
2.2 Pěnové sklo .....	15
2.2.1 Specifikace materiálu.....	17
2.2.2 Možnosti použití .....	18
2.3 Balíky slisovaných starých pneumatik.....	19
2.3.1 Specifikace materiálu.....	20
2.3.2 Možnosti použití .....	21
2.4 Popel a Popílek.....	22
2.4.1 Elektrárenský popílek .....	22
2.4.2 Specifikace materiálu.....	23
2.4.3 Možnosti použití .....	24
2.5 Polystyren.....	25
2.5.1 Specifikace materiálu.....	26
2.5.2 Možnosti použití .....	27
3 Konkrétní realizace vylehčených zemních konstrukcí .....	28
3.1 Rychlostní komunikace R6 – Česká republika .....	29
3.2 Vnitrostátní silnice No. 17 – Norsko .....	30
3.3 Silnice A421 – Velká Británie .....	31
3.4 Dálnice D11 – Česká republika .....	33
3.5 Dálnice D1 – Česká republika .....	34
4 Výpočet sednutí vybrané vylehčené zemní konstrukce.....	35
4.1 Parametry vylehčené zemní konstrukce.....	36
4.2 Výpočet sedání pomocí edometrického modulu .....	37
4.3 Modelování v GEO5 – modul sedání.....	39
4.4 Výsledky modelování v GEO5 .....	40
4.5 Ruční výpočet .....	43
4.6 Porovnání výsledků ručního výpočtu s GEO5 .....	43
Závěr.....	44
Seznam použitých pramenů .....	46
Přílohy.....	48

## Úvod

Technologie zemních konstrukcí je známou a často používanou technologií. Česká republika je zemí, která propaguje tuto technologii, ačkoliv některé materiály do vylehčených zemních konstrukcí prozatím nebyly použity jako např. gumové pneumatiky. V jiných státech evropského kontinentu je tato technologie velmi používaná a podporovaná. Ve Velké Británii si velmi oblíbili využití odpadního materiálu gumové pneumatiky, ve Skandinávii pěnové sklo. Co se týká celosvětového využití této technologie, na západní polokouli v Severní Americe se hojně využívá jako materiál používaný do vylehčených zemních konstrukcí polystyrén. Bakalářská práce se zabývá materiály, které jsou používány do vylehčených zemních konstrukcí a jejich vlastnosti. Ke každému materiálu je vybraná stavba, ve které byl použit daný materiál. Hlavní částí bakalářské práce je výpočet sednutí vylehčené zemní konstrukce pomocí výpočtového geotechnického programu GEO5, který je porovnán s ručním výpočtem při použití stejné metody.

## **1 Definice vylehčených zemních konstrukcí, oblast použití**

Podle mých vlastních slov se dá vylehčená zemní konstrukce jednoduše také chápat jako násyp. Použitý materiál má nízkou objemovou hmotnost, vlastnosti nejsou horší oproti jiným už zaběhlým návrhům (šterkové lože, násypy ze zemin) a provedení násypu je rychlejší. Vylehčením násypového tělesa dosáhneme nižšího zatížení podloží a tím pádem i nižšího sedání. Lehký materiál má stálou kvalitu a lze s ním pracovat i v zimních podmínkách. Nejčastější použití této technologie násypu je v místech, kde je podloží budoucí stavební konstrukce málo únosné, nebo jsou na místě budoucí stavební konstrukce další nepříznivé podmínky. Vylehčený násyp patří do 3. geotechnické kategorie.

Přesnější znění uvádí:

MINISTERSTVO DOPRAVY ODBOR INFRASTRUKTURY. [1]

Citace:

„Obecné podmínky pro návrh a realizaci zemního tělesa s použitím lehkých materiálů jsou v ČSN EN 1997-1. Návrh vylehčených zemních těles musí současně splňovat požadavky ČSN 73 6133, zejména pokud jde o stabilitu. Při návrhu zemního tělesa v přechodové oblasti mostů se postupuje v souladu s ČSN 73 6244.

Tyto technické podmínky respektují současný stav zpracování evropských norem EN 15732 pro použití lehkého keramického kameniva, EN 14933 pro expandovaný polystyren a EN 14934 pro použití extrudovaného polystyrenu do inženýrských staveb.

Základní termíny a definice používané při zemních pracích v pozemních komunikacích jsou uvedeny v ČSN 73 6100 a ČSN 73 6133.“

Oblasti použití:

Dopravní stavby (pozemní komunikace, železnice), sanace sesuvů.

## 2 Materiály používané do vylehčených zemních konstrukcí, specifikace těchto materiálů, možnosti použití

Materiály používané do vylehčených zemních konstrukcí jsou převážně odpadní materiály společnosti nebo průmyslu. V počátku, před 50 lety, se začaly používat piliny a zbytky kůry. V průběhu času se začaly zkoušet nové odpadní materiály, jako třeba sklo, které se dnes velmi hojně využívá a říká se mu pěnové sklo. Dalším materiálem jsou např. vylehčené jílové agregáty, expandovaný polystyren, pórobeton, gumové pneumatiky slisované do bloků nebo drcené, popel a popílek, slisované umělohmotné láhve do bloků, uhelná hlušinová sypanina, strusky, recyklované materiály.

V mé bakalářské práci jsem si vybral 5 druhů materiálů používaných do vylehčených zemních konstrukcí: Keramické kamenivo, Pěnové sklo, Slisované bloky z pneumatik, Elektrárenský popílek, Polystyren.



Obr. 1: Keramické kamenivo, velikost: 0 – 16 mm [2]



Obr. 2: Pěnové sklo, velikost: 10 – 60 mm [3]





Obr. 3: Balík ze slisovaných pneumatik [4]



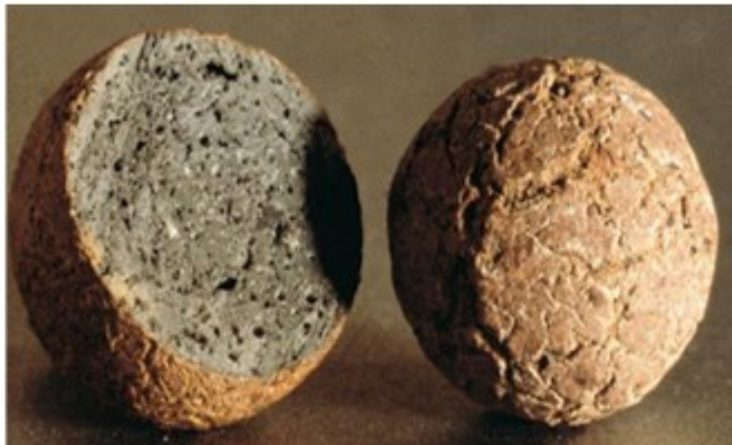
Obr. 4: Elektrárenský popílek [5]



Obr. 5: Bloky z polystyrenu [6]

## 2.1 Keramické kamenivo

Keramické kamenivo u nás známé jako Liapor je přírodní lehký stavební materiál vyráběný z jílu. Jedná se o keramickou hmotu, která se řadí mezi nejstarší a nejosvědčenější stavební materiály. Základní vlastnosti materiálu jsou: pevnost, malá nasákavost, stálost, zdravotní nezávadnost, velmi nízká objemová hmotnost a vynikající tepelně izolační vlastnosti. Keramické kamenivo - Liapor je obchodní značka Keramzitu, který vyrábí evropská skupina výrobců lehkých stavebních hmot Lias. Keramzit je obecný název pro lehká kameniva vyráběná výpalem a expandací přírodních jílu.



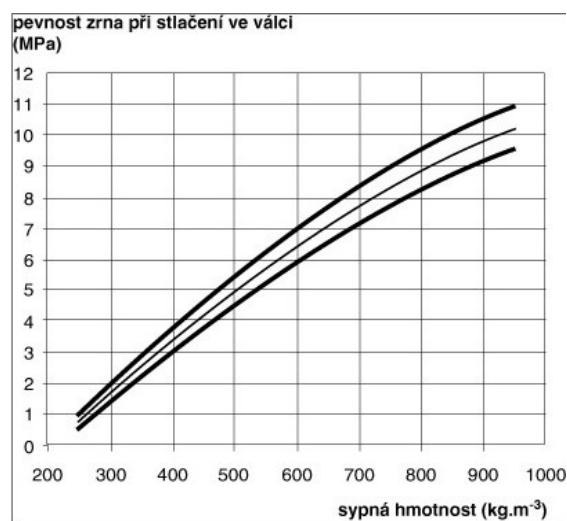
Obr. 6: Keramické kamenivo Liapor [2]

### 2.1.1 Specifikace materiálu

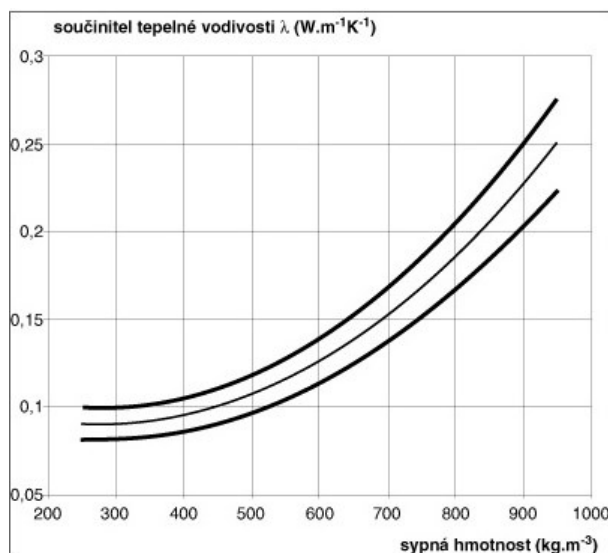
Hlavní materiál Liaporu je jíl, který obsahuje minerály: illit, kaolinit, křemík, a dále úlomky slíd a fosilní zbytky. Pro upřesnění informací v tabulce uvádím znění výkladu od výrobce. [2]

Vlastnosti	Specifikace
Barva	Hnědá, červená, černá
Objemová hmotnost	250 – 2600 kg/m <sup>3</sup>
Zrnitost	0 – 16 mm
Tepelná vodivost $\lambda$	0,09 – 0,15 [W/m·K]
Nasákavost zrna	0,2 obj. %
Pevnost v tlaku	0,7 – 10,0 MPa
Objemová stálost	stabilní
Mrazuvzdornost	ano
Vlhkost	1 – 25% hmotnosti
Inertní stavební látka	ano
Recyklovatelnost	100%
Třída stavebního materiálu	A1
Bod měknutí zrna	1050°C
Zdravotní nezávadnost	ano

Tab. 1: Specifikace keramického materiálu [2]



Obr. 7: Pevnost v tlaku [2]



Obr. 8: Tepelná vodivost [2]

### Objemová hmotnost

Liapor má velmi nízkou hmotnost. Sypná hmotnost je mezi 250 až 900 kg/m<sup>3</sup>. Objemová hmotnost zrn je mezi 500 až 1500 kg/m<sup>3</sup>. Specifická hmotnost materiálu je 2300 až 2600 kg/m<sup>3</sup>. Mezerovitost volně sypaného Liaporu je 40 až 50 %. Mezerovitost drceného Liaporu je 55 až 65 %. Setřesitelnost Liaporu je 2 až 13 %. Setřesitelnost drceného Liaporu je 8 až 20 %.

[2]

### Vlhkost

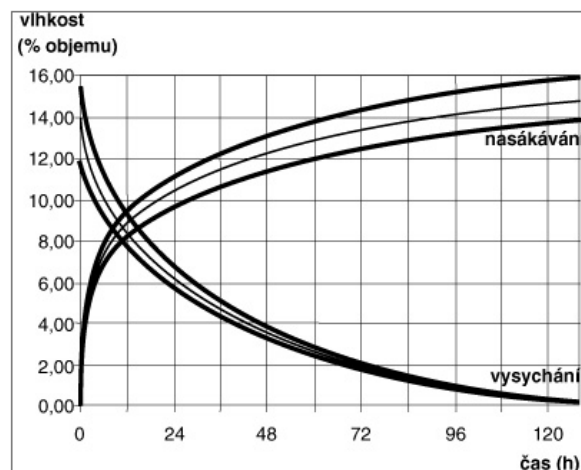
Výhodou Liaporu je, že může být dodáván v dokonale suchém stavu. Liapor je ve výrobě skladován z části v uzavřených silech a z části na otevřených skládkách. Materiál skladovaný v uzavřených silech má vlhkost do 1 % hmotnosti, zatímco materiál skladovaný na otevřených skládkách mění vlhkost v závislosti na počasí od 1 až do 25 % hmotnosti. Pro některé aplikace, jako např. zásypy dřevěných konstrukcí nebo suché maltové či betonové směsi, je možno použít pouze suchý materiál (tedy s garantovaným obsahem vlhkosti do 1 %), přičemž tento požadavek musí být uveden v objednávce. [2]

## Nasákavost

Liapor není hygroskopický a nepřijímá vlhkost ze vzduchu. Přirozená ustálená vlhkost je 0,2 % objemu. Pokud je Liapor umístěn do konstrukce suchý a je chráněn proti přímému přístupu vody, zůstává dokonale suchý. Samotné zrno, zásyp ani výrobky z Liaporu nemají kapilární strukturu a voda v nich tudíž nevzlíná. Pokud je zrno zcela ponořeno pod vodu, postupně nasákává, ale na vzduchu poměrně rychle vysychá. Průběh nasakování, více tabulka 2. Nasákavost a průběh nasakování a vysychání, více obrázek 9. [2]

Nasákavost	Hmotnostní	Objemová
po 30 minutách	2 až 7 %	1 až 4 %
po 24 hodinách	7 až 19 %	6 až 8 %
po 48 hodinách	20 až 25%	11 až 13%
po 120 hodinách	22 až 30%	13 až 16%
po 180 dnech	30 až 45%	18 až 24%

Tab. 2: Nasákavost [2]



Obr. 9: Průběh nasakování a vysychání [2]

## 2.1.2 Možnosti použití

Keramické kamenivo - Liapor má velmi široké využití. Materiál je používán do vylehčených zemních konstrukcí ale také při různých sanacích sesuvů, např. sanace sesuvu u Hřebečského tunelu. Příklad využití materiálu jako zemní vylehčená konstrukce, např. podkladní vrstva na rychlostní komunikaci R6 v úseku Jenišov – Nové Sedlo. Další využití materiálu mohou být zásypy (zásypy přechodových oblastí mostů, stropů, tepelná izolace střech, ochrana krytiny ploché střechy, podsyp pod sádkartonové podlahy, zásypy energovodů, extenzivní a intenzivní ozelenění střech, dekorační účely, hřiště a travnaté plochy, pěstební účely, filtrační zásypy pro čištění odpadních vod, zpevněné násypy). Ve stavebnictví má keramické kamenivo využití jako přísada do stavebních materiálů. Materiál můžeme nalézt v produktech, jako jsou lehké betony Liaporbeton, Transportbeton, různé malty, omítky, zdivo, ploty, svahovky, schodiště, obrubníky, zámková dlažba, stropní konstrukce, protihlukové stěny.

### Způsob aplikace

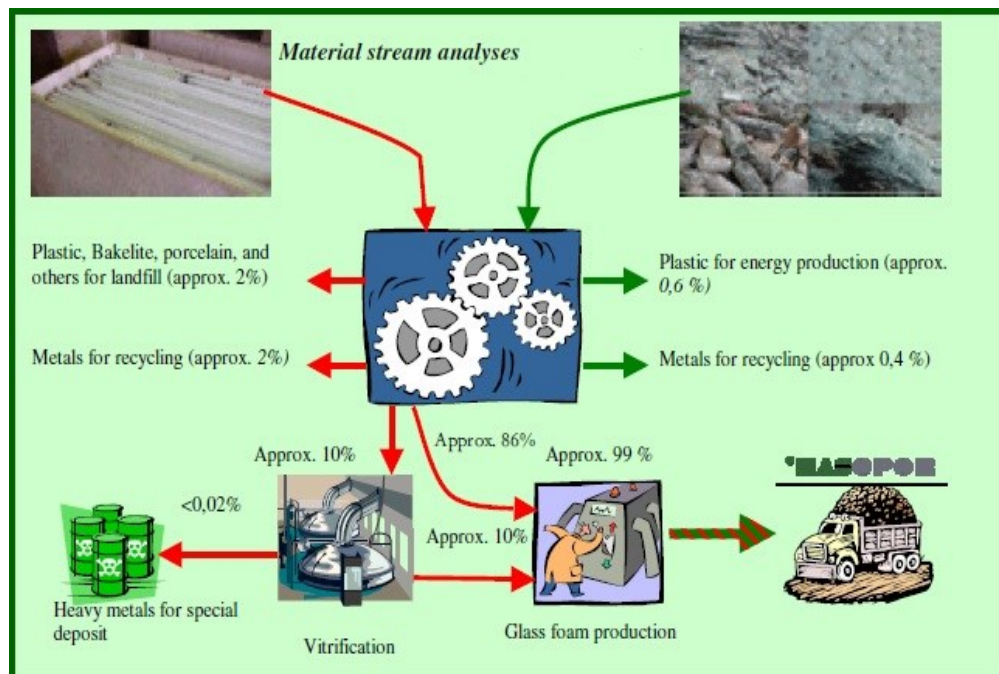
Keramické kamenivo se zhutní po vrstvách. Máme-li drcené keramické kamenivo, zhutní se bez mezivrstev. Když máme podloží dobře zhutněno a odhumusováno, keramické kamenivo se naveze a zhutní. Pokud máme podloží v nepříznivých podmínkách, použije se geosyntetikum se separační, filtrační a výztužnou funkcí. Při vysokých násypech je běžná kombinace keramického kameniva s geomřížemi. Materiál vhodný ke kombinaci s keramickým kamenivem je popílek, nebo vápno. [1]



Obr. 10: Podkladní násyp na rychlostní komunikaci R6 [7]

## 2.2 Pěnové sklo

Pěnové sklo je odpadní materiál, který se hromadí na skládkách mnoha zemí. Materiál používaný pro výrobu pěnového skla je samotné sklo. Jsou to různé žárovky, rtuťové výbojky, láhve, okenní tabule, čelní skla aut, veškerý odpadní materiál z průmyslu. Tyto materiály procházejí různými recyklačními procesy, protože některé mohou obsahovat toxické sloučeniny. V Norsku se rozhodli tento materiál využívat pro vylehčené zemní konstrukce pod obchodním názvem Hasopor, a také ve Švýcarsku. U nás je tento materiál znám pod názvem Geocell nebo Refaglass, který se využívá spíše jako tepelněizolační materiál pro rodinné domy, než jako materiál pro technologii vylehčených zemních konstrukcí.



Obr. 11: Recyklační proces [8]

Překlad obrázku 11

Material stream analyses: analýza materiálu; Plastic, Bakelite, porcelain, and other for landfill: Plasty, Bakelit, porcelán, a další materiál pro skládky; Plastic for energy production: Plasty pro výrobu energie; Metals for recycling: Kovy k recyklaci; Approx: cca (přibližné množství); Glass foam production: Výroba pěnového skla; Verification: Verifikace (ověření správnosti); Heavy metals for special deposit: Těžké kovy pro speciální úschovu

## Výroba pěnového skla

Proces výroby spočívá v přeměně jemně broušeného skelného prášku z různých druhů skla smíchaného s aktivátory, jako je karbid křemičitý v pěnovém skle. Prášek ze skla je nanesen na ocelový pásový dopravník přes vysokoteplotní pec (900°C), přičemž prášek expanduje 4x, pec poté opouští jako pevné sklo pěnového materiálu. Když výrobek opouští pec, začne praskat a rozdělí se na menší jednotky vzhledem k teplotnímu šoku. Běžná velikost jednoho kusu je pak mezi 10 – 60 mm. Na obrázku 12 můžeme vidět typickou částici hotového výrobku a na obrázku 13 můžeme vidět materiál opouštějící pec. [8]



Obr. 12: Pěnové sklo, velikost: 10 – 60 mm [3]



Obr. 13: Pěnové sklo při opouštění vysokoteplotní pece [9]



### 2.2.1 Specifikace materiálu

Hlavní materiál pěnového skla je recyklované sklo ze skládek. Pěnové sklo se skládá z 8% ze skla a z 92% z plynových bublin. [8]

Vlastnosti	Specifikace
Barva	šedá
Váha sypaniny, volná	180 – 225 kg/m <sup>3</sup>
Zrnitost	10 – 60 mm
Tepelná vodivost $\lambda$ při zhutnění 1,3:1	0,080 [W/m·K] (početní hodnota)
Vnitřní nasákavost zrna	0 obj. %
Únosnost materiálu po zhutnění	0,64 - 1,3 MPa
Koeficient zhutnění	1,1 – 1,3
Mrazuvzdornost	ano
Zamezení vzniku kapilarity	ano
Inertní stavební látka	ano
Recyklovatelnost	100%
Třída stavebního materiálu	A1
Tvorba kapek a dýmu	žádné
Bod měknutí zrna	700°C
Zdravotní nezávadnost	ano

Tab. 3: Specifikace pěnového skla [8]

### 2.2.2 Možnosti použití

Pěnové sklo má široké využití, nejen jako materiál využívaný do vylehčených zemních konstrukcí, ale také jako materiál tepelněizolační. Materiál jako součást vylehčené zemní konstrukce byl použit např. při sanaci svahu na vnitrostátní silnici No. 17 v Norsku nebo při sanaci nábřeží na vnitrostátní silnici No. 120 v Norsku. Můžeme se s tímto materiálem setkat při izolaci základové desky podsklepené / nepodsklepené, drenážních systémech, izolaci a rekonstrukci podlah, izolaci mezistropních prostor a kleneb, izolaci plochých střech a bazénů.

#### Způsob aplikace

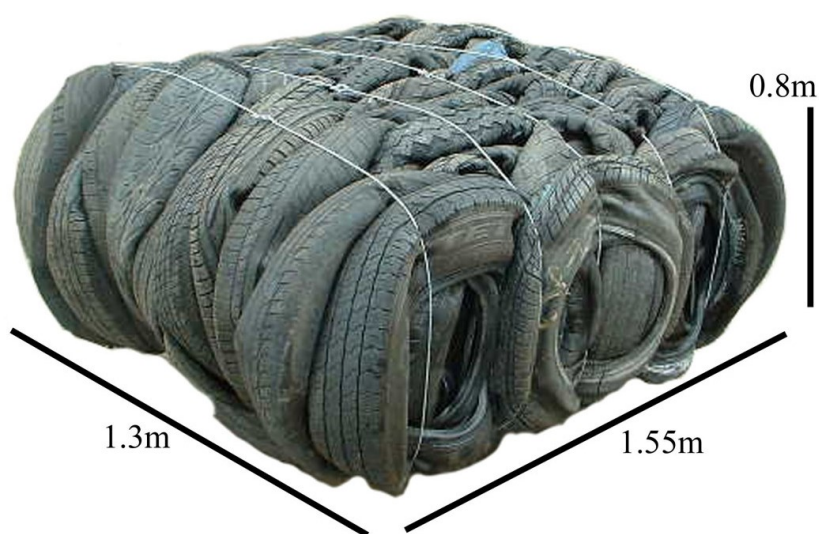
Pěnové sklo má podobnou aplikaci jako keramické kamenivo. Zhutnění probíhá po vrstvách. Aby nedocházelo k pronikání jemných částic zemin do zemního tělesa, pěnové sklo se zaobaluje do geotextilií. Při budování vysokých násypů se mohou použít geomříže, například při sanaci sesutých svahů.



Obr. 14: Násyp pozemní komunikace [8]

### 2.3 Balíky slisovaných starých pneumatik

V dnešní době je velmi rozšířen dopravní průmysl a s tím je spojeno vytváření skládek s ojetými starými nepoužitelnými pneumatikami, což je velký problém pro mnoho států. Ve Spojených státech Amerických a Velké Británii se s tím úspěšně vypořádali, a začali staré pneumatiky lisovat do bloků. Pomocí jednoduchého stroje se pneumatiky stlačí a sváží ocelovým drátem. V roce 2010 byla udělena Flemingova cena (Kidd – McNeill – Beales 2010) na silnici A421 (Velká Británie), na které byla použita technologie vylehčené zemní konstrukce s použitím materiálu starých pneumatik. U nás zatím není konstrukce, která by obsahovala balíky starých pneumatik, ale existuje minimálně jeden subjekt, který již vlastní výrobní linku pro výrobu bloků z pneumatik. Balíky pneumatik jsou využívány hlavně pro svou nízkou hmotnost a cenu.



Obr. 15: Balík ze starých slisovaných pneumatik [4]



Obr. 16: Ukládání balíků starých pneumatik [4]

### 2.3.1 Specifikace materiálu

Vlastnosti	Specifikace
<b>Barva</b>	černá
<b>Nominální obj. hmotnost</b>	470 kg/m <sup>3</sup> (± 50 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Skutečná obj. hmotnost</b>	500 kg/m <sup>3</sup> (± 50 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Pórovitost</b>	62% (± 5%)
<b>Vnitřní nasákavost zrna</b>	0 obj. %
<b>Smyková pevnost</b>	35° až 36°
<b>Youngův modul přetvárnosti</b>	800-1000 MPa
<b>Celkový creep (35 měsíců)</b>	do 1.1%
<b>Propustnost ve vertikálním směru</b>	0.1-0.2 m.s <sup>-1</sup>
<b>Propustnost v horizontálním směru</b>	0.02-0.04 m.s <sup>-1</sup>

Tab. 4: Parametry bloků vyrobených ze slisovaných starých pneumatik [4]

### 2.3.2 Možnosti použití

Použití starých pneumatik není pouze omezeno jako materiál do vylehčených zemních konstrukcí, balíky ze starých pneumatik, mohou být využity např. pro stabilizaci svahů po sesuvech.

#### Způsob aplikace

Balíky z pneumatik se nehnou, protože jsou slisovány a staženy ocelovým drátem. Ukládají se vedle sebe. Mezery mezi balíky jsou prosypávány keramickým kamenivem. Při budování vylehčené zemní konstrukce s použitím balíků z pneumatik je ochrana výplně pomocí geotextilií.



Obr. 17: Použití bloků starých pneumatik pro stabilizaci svahů po sesuvech [4]



Obr. 18: Ukládání balíků starých pneumatik na silnici A421 [4]

## 2.4 Popel a Popílek

Po celém světě se najdou místa, kde se hromadí popel a popílek. Jejich množství přesahuje miliardy tun, např. v roce 2009 se využilo ve starých zemích Evropské unie 15,4 mil. tun popílku. V České republice při stavbě dálnice D11 (Osičky-Hradec Králové) to bylo 100 tisíc tun za rok. Popel a popílek je materiál, který se řadí do několika podskupin: popel a popílek, struska a škvára, fluidní popel a popílek, ložový popel, popílkový stabilizát, stabilizovaný popel nebo popílek, energosádrovec, atd. Popel a popílek je získávaný převážně z odkališť nebo jako zbytky při spalování např. mletého uhlí, ale také při výrobním procesu (granulace, aglomerace). Do vylehčených zemních konstrukcí lze použít pouze popílkový stabilizát, který musí splňovat podmínky dle ČSN EN 14227-14 a ČSN EN 13286-49. Preferuje se popel získávaný při spalování uhlí. Přesnější znění využití popelu a popílku na pozemních komunikacích pro Českou republiku uvádí TP 93. Nejběžnější použití je popílkový stabilizát nebo jako samostatný popel a popílek jako výplňový materiál do zemního tělesa. [4]

### 2.4.1 Elektrárenský popílek

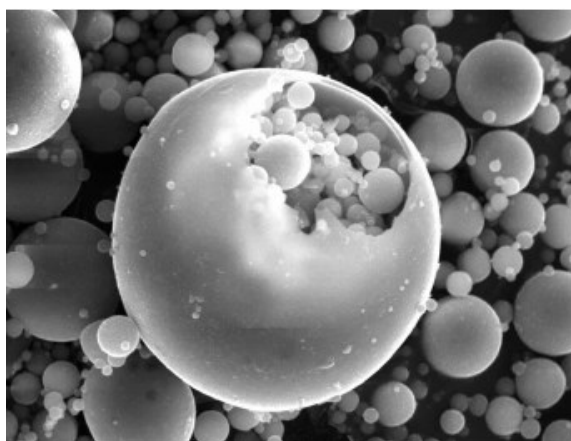
Elektrárenský popílek je produkt získaný spalováním uhlí v tepelných elektrárnách, vyznačující se obsahem velmi jemných stejnozrnných částic kulovitěho tvaru (viz obr. 20). Před spalováním je uhlí rozemleto v mlýnech a vháněno do kotle proudem horkého vzduchu, přitom je spalováno za teploty  $(1500 \pm 2000) \text{ }^\circ\text{C}$ . Reakce závisí nejen na teplotě, ale také na typu spalovaného uhlí, velikosti pomletých spalovaných částic a na době spalování. Průměrná zrnitost elektrárenských popílků je od 0,2 do 200  $\mu\text{m}$  průměru částic. Velikost popílkových zrn dosahuje 0,1 – 100 mm. [4,10]

Spalování vytváří dva typy druhotné suroviny:

- klasický úletový (polétavý) popílek (cca 80% ze vzniklého polétavého druhotného materiálu)
- ložový popel někdy nazývaný jako popelová struska (cca 20%). [10]



Obr. 19: Elektrárenský popílek [5]



Obr. 20: Mikroskopický snímek popílku [11]

#### 2.4.2 Specifikace materiálu

Vlastnosti	Specifikace
<b>Barva</b>	Bílá, šedá, černá
<b>Suchá objemová hmotnost</b>	650 – 900 kg/m <sup>3</sup>
<b>Dobře zhutněný s w<sub>opt.</sub> (20-35%)</b>	1100 – 1200 kg/m <sup>3</sup>
<b>Doporučená hmotnost w<sub>opt.</sub> (25%)</b>	1280 kg/m <sup>3</sup>
<b>Zrnitost</b>	0.1-100 mm
<b>Smyková pevnost</b>	Φ <sub>ef</sub> : 32.8-40.0° ; c <sub>ef</sub> : 4.4-12.7 kPa
<b>Vlhkost w<sub>opt.</sub></b>	25%
<b>Modul deformace</b>	5-12 Mpa
<b>Koeficient propustnosti</b>	5.10 <sup>-4</sup> – 5.10 <sup>-8</sup> m.s <sup>-1</sup>

Tab. 5: Fyzikálně mechanické vlastnosti [4]

### 2.4.3 Možnosti použití

Uplatnění popelu a popílku najdeme v dopravním stavitelství jako výplňový materiál do vylehčených zemních konstrukcí, ale také do konstrukčních vrstev jako popílková suspenze. Popílkovou suspenzi můžeme také využít jako stabilizát při porušení terénu na povrchu vlivem hornické činnosti např. kladenský uhelný revír. Dalším příkladem využití může být sanace odvalu dolu Kladno.



Obr. 21: Podkladní násyp na rychlostní komunikaci R6 [7]



Obr. 22: Stavba cyklostezky Horní Počaply [12]



## 2.5 Polystyren

Polystyren je nejlhčí dostupný materiál používaný ve stavebním průmyslu. Dělí se na dva základní typy, EPS – expandovaný polystyren a XPS – extrudovaný polystyren. Pro výstavbu pozemních komunikací se používá expandovaný polystyrén (EPS). Extrudovaný polystyrén (XPS) se používá pro speciální velmi namáhané konstrukce, kde má i funkci proti namrzání, pro násypy se z důvodů vyšší ceny nepoužívá. Materiál je ekologicky nezávadný syntetický materiál, ze kterého se nevyluhují vodou žádné škodlivé látky. Má velmi dobrou odolnost proti působení humínových kyselin, zásad, lihu a přírodním olejům. Na polystyren mají nežádoucí účinky minerální oleje a organická rozpouštědla. Více než třicetileté zkušenosti ukazují, že drobní savci (hraboši, myši apod.) jej nenapadají a nevytvářejí v něm skrýše. EPS pro stavbu násypu se vyrábí ve velkých blocích, které lze na krátkou vzdálenost přenést. Bloky mají hmotnost okolo 60 kg. Obvyklé rozměry jsou: délka 2 až 5 m, šířka 1 až 2 m, výška 0,5 až 0,6 m. Minimální životnost EPS výrobci uvádějí na 80 let. [1]



Obr. 23: Bloky z polystyrenu [6]



Obr. 24: Ukládání polystyrenu, dálnice D1 [6]

## 2.5.1 Specifikace materiálu

Expandovaný polystyren (EPS)

- Extrémně lehký syntetický materiál, který vzniká zvětšením objemu polystyrenových perel při jejich zahřátí. Objemová hmotnost se pohybuje nejčastěji mezi (15 – 30 kg/m<sup>3</sup>).

Extrudovaný polystyren (XPS)

- Extrémně lehký materiál, který vzniká stříkáním roztavené základní hmoty do které je přidán kvasicí přípravek, má vyšší objemovou hmotnost (35-45 kg/m<sup>3</sup>). [14]

Expandovaný polystyren EPS	Francouzský předpis	Vägverket švédské silnice	Banverket švédské železnice
Polystyren	EPS, XPS	EPS, XPS	XPS
Objemová hmotnost (kg/m <sup>3</sup> )	15-20-25-30	15-20-30	35-40-45
Pevnost (kPa) při $\varepsilon = 10\%$	70-100-150-200		
Pevnost (kPa) při $\varepsilon = 5\%$		55-100-175	400-450-550
Pevnost (kPa) při $\varepsilon = 2\%$		45-75-140	

Tab. 6: Vlastnosti bloků polystyrenu používaných do vylehčených násypů [1]

Přípustné zatížení EPS v násypu pozemní komunikace v závislosti na jeho objemové hmotnosti a způsobu zatížení je v tabulce 7. Přípustné zatížení EPS je omezeno max. svislým stlačením 2% výšky. Do této hodnoty se EPS přetváří pružně. Po překročení 2% deformace dochází u EPS k porušování EPS perel, ze kterých jsou bloky slisovány. [1]

Objemová hmotnost EPS	Stálé zatížení	Stálé a proměnné (dopravní) zatížení	Stálé zatížení (pouze ojedinelé vozidlo)
kg/m <sup>3</sup>	kPa	kPa	kPa
15	12	30	38
20	20	45	57
30	35	75	95

Tab. 7: Přípustné zatížení EPS [1]

## 2.5.2 Možnosti použití

Využití polystyrenových tabulí nalezneme především u systémů zateplování budov. V současnosti má tento materiál široké využití jako výplňový materiál do vylehčených zemních konstrukcí. V České republice, je polystyren jako materiál vylehčených zemních konstrukcí použit na dálnici D1 (úsek Vyškov – Mořice). Ve Spojených státech amerických je tato metoda vylehčené zemní konstrukce více propagována. V Evropě to jsou skandinávské země. Materiál je recyklovatelný a jeho uplatnění můžeme také nalézt jako příměs do betonových směsí.

### Způsob aplikace

Podloží pod násypem musí být vodorovné. Povolená odchylka je 10 mm na 3m. Při nepříznivých podmínkách se před uložením EPS bloků podsypává pískem. Ukládání probíhá ve vrstvách (stejný systém jako u stavby zdi z cihel). Šířka svislých spár nesmí přesahovat 5 mm. Pro zabránění posunu EPS bloků se vkládají ocelové hmoždinky. Krajní řády se přikotví ocelovými tyčemi ve 2 metrových rozstupech. Cele zemní těleso z EPS bloků je nakonec zabaleno do geotextilií. [1]



Obr. 25: Nábřeží se svislými stěnami z EPS bloků, Oslo (Norsko) [8]

### 3 Konkrétní realizace vylehčených zemních konstrukcí

Stavby realizací s využitím vylehčených zemních konstrukcí jsem přednostně vybíral s ohledem tak, aby to byly konstrukce na českém území. Budu hovořit o rychlostní komunikaci R6, kde byl použit keramický materiál, ale taky elektrárenský popílek. Ten byl také například použit při stavbě násypu na dálnici D11 v úseku Osíčky – Hradec Králové. Při budování konstrukce vozovky na dálnici D1 v úseku Vyškov – Mořice, byl použit polystyren. U pěnového skla a balíku z pneumatik, musíme jít za hranice českého státu, protože stavby s využitím technologie vylehčených zemních konstrukcí pro daný typ materiálů, u nás zatím nejsou.



Obr. 26: 1- R6, 2 - No. 17, 3 - A421, 4 - D11, 5 - D1, [7, 8, 14, 17,21]

### 3.1 Rychlostní komunikace R6 – Česká republika

Rychlostní komunikace spojí Karlovy Vary s Chebem. Na mnoha místech tratě jsou komplikované geologické podmínky a muselo být použito několik speciálních technických metod, například technologie vylehčených zemních konstrukcí. Jedna z takových specifikací se nachází poblíž Slavkovského lesa, kde jsou uhelné ložiska a s tím spojené velmi nevhodné zeminy v nadloží. Vzhledem ke špatným vlastnostem zeminy, která byla získána při stavebních pracích, nemohla být tato zemina znovu použita a muselo se najít vhodné řešení. Byla navržena úprava zeminy pomocí elektrárenského popílku. Další způsoby budování násypů byly sendvičové konstrukce v kombinaci elektrárenského popílku o nominální objemové hmotnosti 1100 - 1200 kg/m<sup>3</sup> s keramickým kamenivem Liapor o nominální objemové hmotnosti 500 kg/m<sup>3</sup>. Sendvičová konstrukce v poměru 3:2 (3 díly keramického kameniva a 2 díly elektrárenského popílku) byla hlavně využita u přechodových oblastí mostů, kterých je poblíž Slavkovského lesa postaveno 8. Vzhledem k nevhodnosti zemin a vysokým násypům, výpočty ukazovaly na velké sedání v desítkách centimetrů a také dlouhodobé sedání v řádu let. Byl proveden přitěžovaný násyp, který sedání výrazně urychlil. V případech vysokých násypů, kde byl použit vylehčený materiál, se žádný přitěžovaný násyp dělat nemusel. [7]



Obr. 27: Násyp u přechodové oblasti mostu [7]

### 3.2 Vnitrostátní silnice No. 17 – Norsko

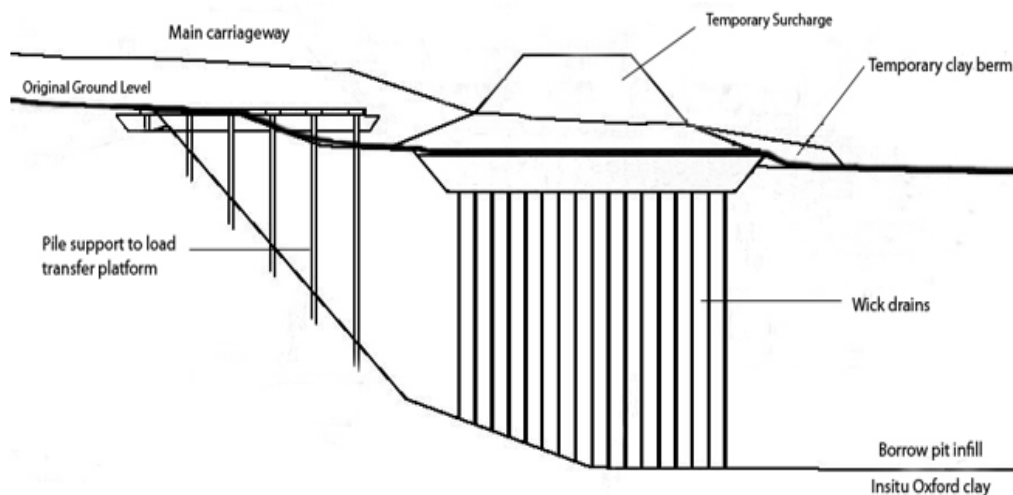
V důsledku eroze podél koryta řeky se zřítil 10m vysoký svah v rozsahu 30m . Na úrovni řeky a ve svahu se podloží skládá ze středně pevného jílu. Aby se mohla znovu otevřít cesta v úseku podél řeky a zbaránit další erozi a sesuvům podél břehu, bylo nutné provést rychlé opatření. Než mohla být provedena sanace pomocí pěnového skla, byla provedena ochrana proti erozi pomocí trhacích prací. Vzhledem k nízké objemové hmotnosti pěnového skla bylo snadné dopravit na místo havárie 100 m<sup>3</sup> pěnového skla. Materiál byl rozdělen na vrstvy o tloušťce 0,5m a pomocí 30t pásového podvozku lopatového rypadla zhutněno 3 – 4 krát. Na obrázku 28 můžeme vidět proces hutnění, ukládání materiálu a separační fólii. K sesuvu došlo nedaleko zpracovatelského závodu pěnového skla v oblasti středního Norska v době, kdy pěnové sklo bylo použito v rámci projektu pro prozkoumání tepelných vlastností jako je mrazuvzdornost. Na základě předběžných zkoušek z projektu se rozhodlo použít pěnové sklo k sanaci sesuvné oblasti, která mohla být provedena rychle. Z projektu byly získány nové zkušenosti s materiálem. Snadná manipulace a rychlá rekonstrukce. Vnitřní stabilita byla rovněž uspokojivá na svahovaném povrchu. Po 2 letech vizuálního pozorování se ukázalo, že svah si vede dobře, cesta je bez trhlin a porušení. Byly také provedeny zkušební jámy pro kontrolu zrnitosti a hustoty do budoucna. [8]



Obr. 28: Sanace silnice a sesuvu svahu [8]

### 3.3 Silnice A421 – Velká Británie

Silnice A421 dostala vylepšení v podobě nové technologie vylehčených zemních konstrukcí. Jako materiál byly použity balíky z pneumatik. Jedná se o napojení dálnice M1, která je ve spojení se silnicí A421 pomocí křižovatky, jejíž opravovaná část dále pokračuje k městu Bedford. Brogborougské nábřeží, které leží poblíž křižovatky M1 s A421, je realizováno pomocí 7m vysokých násypů. V místech budoucího násypu bylo v minulosti uloženo velké množství jílu. Bylo vybráno řešení, hlavní vozovka M1 bude podporována pomocí pilot s geotextilií, na vedlejší vozovce A421 bude použita technologie vylehčené zemní konstrukce v kombinaci s vertikálními drény, viz obr. 29. Cílem bylo odstranění zeminy a nahrazení lehkou výplní. Vylehčený materiál balíky ze starých pneumatik byl zvolen firmou Balfour Beatty jako alternativa pro výplň konstrukce silnice A421. Balíky z pneumatik o nominální objemové hmotnosti  $470 \text{ kg/m}^3$  byly prosypávány keramickým kamenivem Maxit o objemové hmotnosti  $300 - 800 \text{ kg/m}^3$ . Keramické kamenivo bylo vibrováno do dutin balíků z pneumatik. Vylehčená výplň je obalena geotextilií a následně pak zasypána zeminou. Normové specifikace pro daný typ materiálu vylehčené zemní konstrukce udává britská norma PAS 108:2007. Tento typ konstrukce se ukázal jako velmi jednoduchý, rychlý a snadno realizovatelný. Rekonstrukce křižovatky a výstavba silnice A421 získala v roce 2010 Flemingovu cenu. [15]



Obr. 29: Model řešení křižovatky M1 a A421 [15]

Překlad obrázku 29

Main carriageway: hlavní vozovka, Original Ground Level: původní úroveň terénu, Pile support load transfer platform: pilotové založení s přenosem zatížení do plošiny, Temporary Surcharge: dočasné přetížení, Temporary clay berm: dočasný jílový zásyp, Wick drains: vertikální drény, Borrow pit infill: zemní výplň, Insitu Oxford clay: Oxfordský jíl



Obr. 30: Balíky z pneumatik prosypané keramickým kamenivem, silnice A421 [16]



Obr. 31: Uložení balíků ze starých pneumatik, silnice A421 [16]



### 3.4 Dálnice D11 – Česká republika

První větší použití popílku v České republice bylo na komunikaci R6 Louny - Obchvat v roce 1995. Popílek byl z elektrárny Počeradý a byl promíchán s vápnem. Později při rekonstrukci rychlostní silnice byl použit samotný elektrárenský popílek v kombinaci s keramickým kamenivem Liapor. Další velká stavba s využitím popílku do násypu je na dálnici D11 v úseku Osičky – Hradec Králové. Popílek byl odebírán z elektrárny Opatovice. Délka úseku dálnice, kde byl použit násyp z popílku, je 1,5 km. Výška násypu větší než 10m v kombinaci se ztužujícími vrstvami zeminy po cca 1m elektrárenské strusky. Do zemního tělesa bylo uloženo více než 500 000 m<sup>3</sup> popílku. [17]



Obr. 32: Rozprostření popílku k hrázce [17]



Obr. 33: Doprava popílku na staveniště budoucí dálnice D11 [17]

### 3.5 Dálnice D1 – Česká republika

Stavba dálnice D1 byla rozdělena do dvou etap. První úsek Vyškov - Mořice a druhý úsek Mořice - Kojetín. Je to stavba, pro kterou byly poprvé v České Republice vyprojektovány a zrealizovány vysoké násypy z extrudovaného polystyrenu. Stavba byla nominována na stavbu roku a oceněna titulem stavba roku 2006 Jihomoravského kraje. Úsek dálnice Vyškov - Mořice je z hlediska geotechnického velmi náročnou stavbou, budovanou na neúnosném podloží neogenních jílů. Druhý úsek dálnice Mořice - Kojetín prochází hustě osídlenou a zemědělsky využívanou krajinou moravské Hané. Technickým vrcholem stavby je 15m vysoký násyp vytvořený pomocí technologie vylehčené zemní konstrukce s použitím extrudovaného polystyrénu. [14, 18]



Obr. 34: Polystyrenové bloky, dálnice D1 [14]



Obr. 35: Skládání polystyrenových bloku, [14]

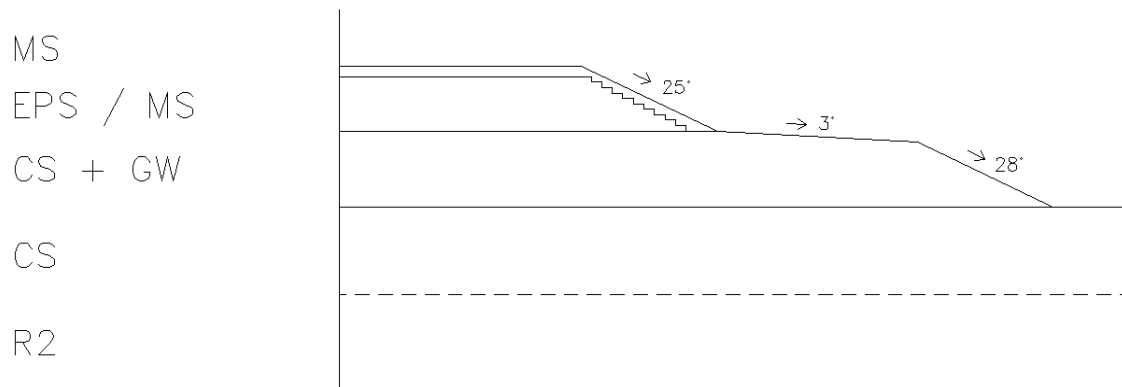
#### 4 Výpočet sednutí vybrané vylehčené zemní konstrukce

Výpočet sednutí vychází ze skutečné konstrukce, kterou jsem si zjednodušil k účelu mé bakalářské práce. Jedná se o vylehčenou zemní konstrukci (násyp), která byla provedena na dálnici D1. Násyp vysoký 15 m se nachází na 51,730 – 51,853 km dálnice D1. V podloží násypu jsou málo únosné neogenní jíly, které se vyznačují vysokou stlačitelností. Z toho důvodu byl násyp realizován jako vylehčená zemní konstrukce. Použitý vylehčený materiál byl polystyren, který se vyznačuje nízkou objemovou hmotností. Sednutí jílové vrstvy je realizováno pomocí ručního výpočtu, které je porovnáno s výpočtem sednutí pomocí výpočtového geotechnického programu GEO5. Zvolené metody výpočtu jsou pomocí edometrického modulu. Vzhledem k faktu, že není možný přístup ke geologickému průzkumu stavby, parametry podloží vylehčené zemní konstrukce a obsypání násypu jsem si vhodně zvolil.



Obr. 36: Přechodová oblast mostu a násypu, [14]

## 4.1 Parametry vylehčené zemní konstrukce



Obr. 37: Skladba vylehčené zemní konstrukce

Rozměry vylehčené zemní konstrukce:

Šířka v koruně násypu: 46 m

Šířka v patě násypu: 136 m

Výška vylehčeného materiálu: 5 m

Výška spodní části násypu: 7 m

Výška horní části násypu: 6 m

Výška celého násypu: 13 metrů

### Popis modelu

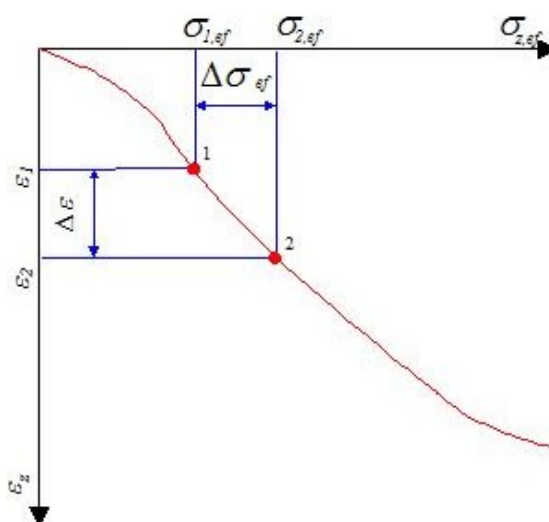
Výpočet sednutí jílovité vrstvy pomocí programu GEO5, která byla nejdříve zatížena násypem z kombinace štěrku a písčitého jílu o mocnosti 7m, pak dalším násypem z polystyrenu o mocnosti 5m, porovnáno s variantou násyp pouze ze zeminy. Nauvažovala se voda. Nestlačitelné podloží se nachází v 8 metrech pod povrchem terénu. Modely násypu jsou vidět na obrázcích 39,40,41.

CS - Jíl písčitý	MS – Hlína písčitá	GW – Štěrk dobře zrněný
$\gamma: 18,5 \text{ KN/m}^3$	$\gamma: 18,0 \text{ KN/m}^3$	$\gamma: 21,0 \text{ KN/m}^3$
Eoed: 4,82 MPa	Eoed: 16 MPa	Eoed: 450 MPa
$\nu: 0,35$	$\nu: 0,35$	$\nu: 0,4$
EPS - Polystyren	R2 - Rula	
$\gamma: 0,2 \text{ KN/m}^3$	$\gamma: 29,0 \text{ KN/m}^3$	
	Eoed: 10 560 MPa	
	$\nu: 0,15$	

Tab. 8: Parametry materiálů použitých při výpočtu sedání

## 4.2 Výpočet sedání pomocí edometrického modulu

Rovnice pro výpočet stlačení vrstvy vychází z definice edometrického modulu přetvárnosti  $E_{oed}$ . Ten získáme pomocí edometrické zkoušky, ze které vyjádříme edometrickou křivku. [19]



Obr. 38: Určení edometrického modulu přetvárnosti  $E_{oed}$ , [19]

Edometrický modul přetvárnosti  $E_{oed}$  můžeme také získat pomocí modulu deformace  $E_{def}$ , který získáme ze směrných normových charakteristik zemin a hornin. Následně použijeme vzorec na přepočítání. Tento způsob získání edometrického modulu není tak přesný, jako při laboratorních zkouškách. [19]

$$E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta}$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}$$

Kde:

$\nu$  - Poissonovo číslo

$E_{def}$  - přetvárný modul deformace

$E_{oed}$  - přetvárný modul edometrický

$\beta$  – součinitel pružného přetvoření

Rovnice pro výpočet sedání pomocí edometrického modulu přetvárnosti.

$$s_i = \sum \frac{\sigma_{z,i} \cdot h_i}{E_{oed,i}}$$

Kde:

$\sigma_{z,i}$  - svislá složka přírůstkového vyvolávající stlačení vrstvy

$h_i$  - mocnost i-té vrstvy

$E_{oed,i}$  - edometrický modul i-té vrstvy

Velikost napětí  $\sigma_{z,i}$  s hloubkou klesá. Při malém  $\sigma_{z,i}$  již nedochází k přemístění zeminy, nedojde k porušení struktury a tedy ke stlačení zeminy. Na kontaktech částic působí tzv. strukturní pevnost, což je odpor proti vzájemnému posunutí daný třením a vazbami mezi částicemi. Závisí na bočnm tlaku a na jakosti povrchu částic zeminy. Boční tlak závisí na velikosti geostatického napětí  $\sigma_{or}$ . Toto napětí roste lineárně s hloubkou. Strukturní pevnost  $\sigma_s$  lze vyjádřit vztahem

$$\sigma_s = \sigma_{or} \cdot m$$

kde  $m$  je opravný součinitel přetížení. Podle ENV, část 6.6.1.(2), se sedání počítá běžně do hloubky, ve které efektivní napětí od přetížení dosáhne 20% efektivního napětí od nadloží, což odpovídá součiniteli  $m = 0,2$ . Hloubka, ve které dochází již jen k zanedbatelným deformacím základové půdy, se nazývá deformační zóna.

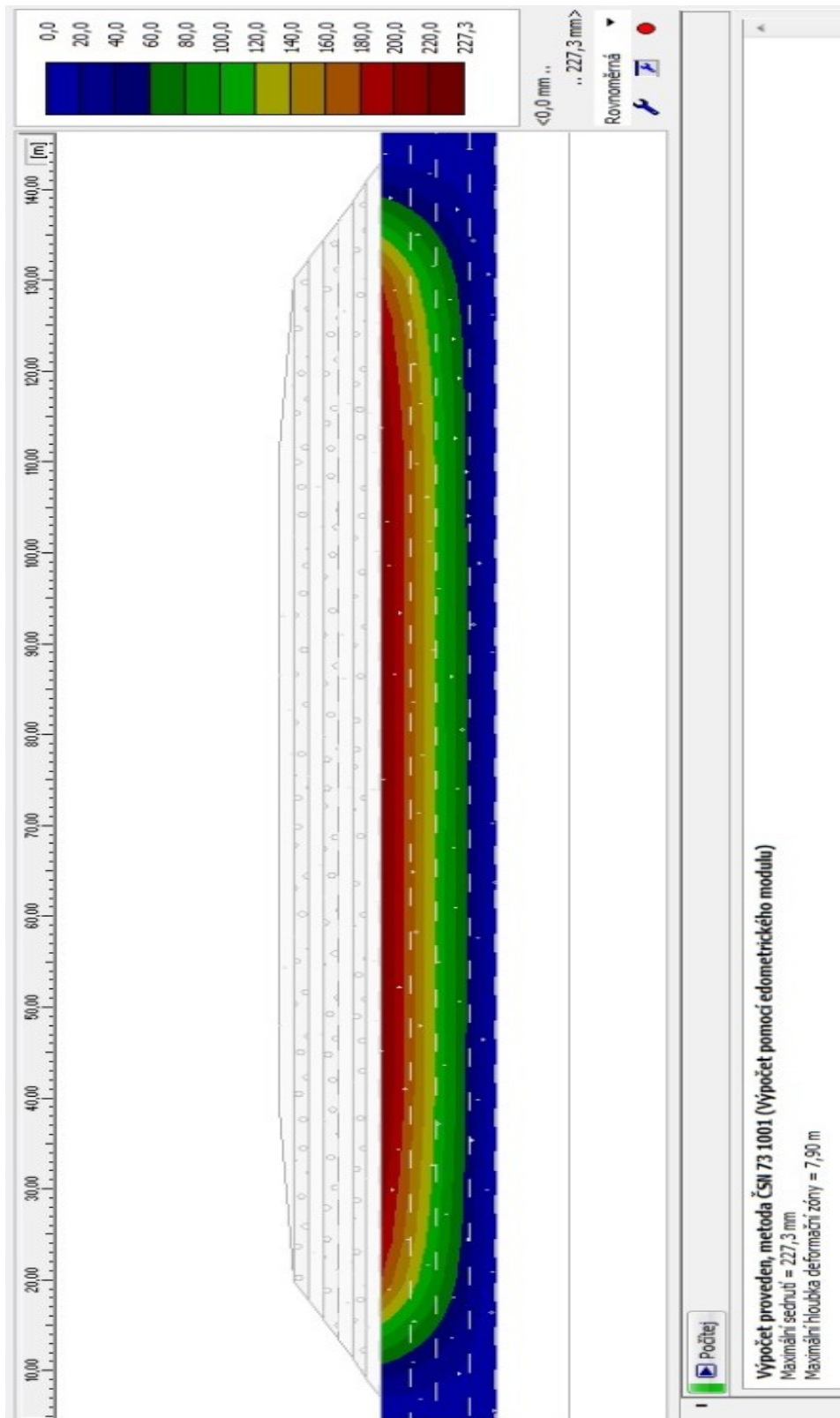
### 4.3 Modelování v GEO5 – modul sedání

GEO5 je soubor programů pro geotechnické výpočty. Systém je složen ze samostatných programů, které mají stejné uživatelské rozhraní a vzájemně spolu komunikují. Každý program řeší určitou geotechnickou úlohu. [22]

#### Modul sedání

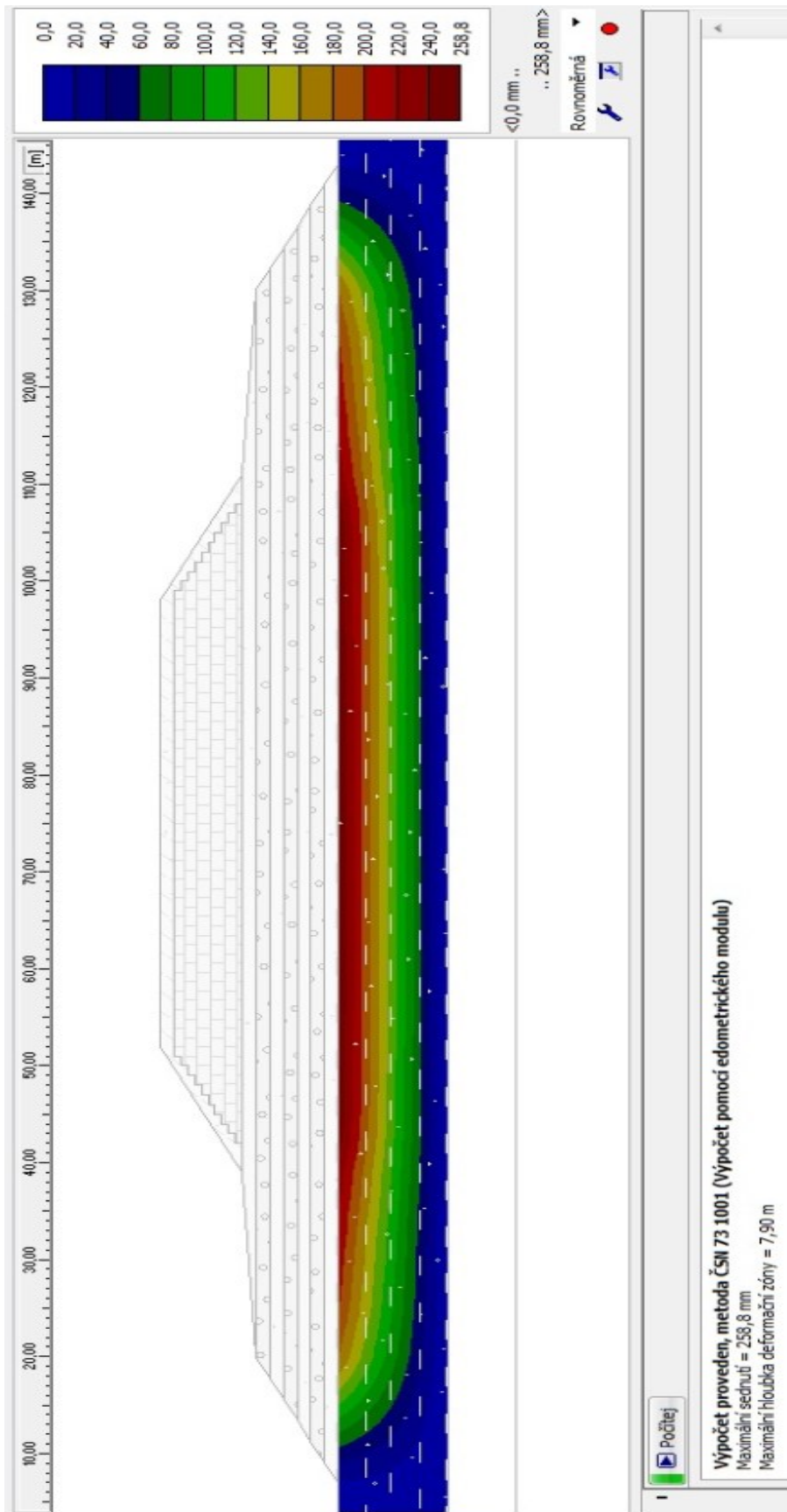
Jedná se o výpočet sedání terénu od přetížení, změny hladiny podzemní vody a určení poklesové kotliny podle ČSN 73 1001. Program pracuje podle různých teorií výpočtu sednutí (Janbu, NEN–Buisman, Soft soil model, pomocí indexu a součinitele stlačitelnosti, sekundární sedání podle Laddeho, ČSN 73 1001). Program umožňuje vkládání libovolného množství zatížení. Je zabudována databáze zemin podle ČSN 73 1001. Možnost omezení deformační zóny podle teorie strukturní pevnosti, procentem geostatického napětí nebo nestlačitelným podložím. Modul umožňuje zobrazení celkových výsledků sednutí nebo rozdílů oproti minulé fázi budování. Další možnosti modulu sedání jsou výpočet konsolidace, výstupy sednutí v jednotlivých vrstvách, zobrazení výsledků pomocí barevné škály. [23]

## 4.4 Výsledky modelování v GEO5

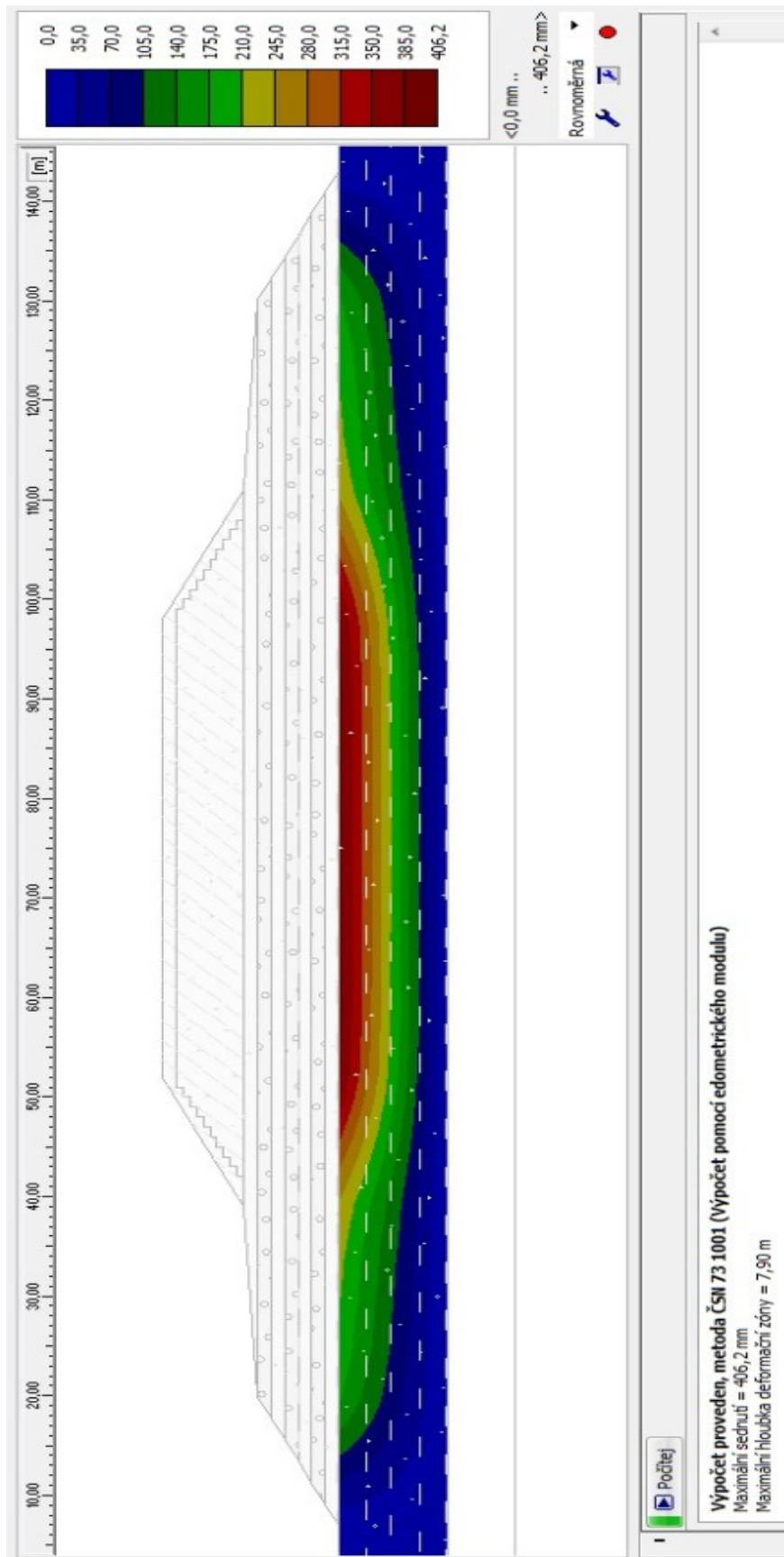


Obr. 39: Spodní část násypu, edometrický modul,





Obr. 40: Celý násyp – výplň polystyren, edometrický modul



Obr. 41: Celý násyp – výplň zemina, edometrický modul

## 4.5 Ruční výpočet

Výpočet stlačení jílové vrstvy po provedení spodní části násypu, metoda: edometrický modul

$$s = \frac{\sigma_z \cdot h}{E_{oed}} = \frac{(3.21 + 4.18,5) \cdot 8}{4,82} = \frac{1096}{4,82} = 227,38 \text{ mm}$$

Výpočet stlačení jílové vrstvy po provedení celého násypu – výplň polystyren, metoda: edometrický modul

$$s = \frac{\sigma_z \cdot h}{E_{oed}} = \frac{\{(3.21 + 4.18,5) + (5.0,2 + 1.18)\} \cdot 8}{4,82} = \frac{1248}{4,82} = 258,9 \text{ mm}$$

Výpočet stlačení jílové vrstvy po provedení celého násypu – výplň zemina, metoda: edometrický modul

$$s = \frac{\sigma_z \cdot h}{E_{oed}} = \frac{\{(3.21 + 4.18,5) + (6.18)\} \cdot 8}{4,82} = \frac{1960}{4,82} = 406.64 \text{ mm}$$

## 4.6 Porovnání výsledků ručního výpočtu s GEO5

	Spodní část násypu		Celý násyp
	Spodní část násypu / E <sub>oed</sub>	Celý násyp / E <sub>oed</sub> (EPS)	Celý násyp / E <sub>oed</sub> (Zemina)
GEO5	227,3 mm	258,8 mm	406,2 mm
Ruční výpočet	227,4 mm	258,9 mm	406,6 mm

Tab. 9: Srovnání výsledků ručního výpočtu a GEO5

## **Závěr**

V teoretické části bakalářské práce jsem popsal nejběžnější materiály používané do vylehčených zemních konstrukcí (keramické kamenivo, pěnové sklo, polystyren, popílek, balíky z pneumatik). Zaměřil jsem se na jejich vlastnosti, výrobní proceduru, možnosti použití a způsoby jejich aplikace. Všechny tyto materiály jsou specifické svou nízkou objemovou hmotností a recyklovatelností s výjimkou popílku. Materiály musí splňovat podmínky uvedené v konkrétních předpisech (ČSN EN, TP).

Při praktické části bakalářské práce jsem pracoval s geotechnickým softwarem GEO5. Pro výpočet sedání jsem pracoval s metodou výpočtu edometrického modulu. Výsledky z geotechnického softwaru GEO5 byly porovnány s ručním výpočtem pro ověření správnosti. Potvrdilo se, že vylehčený materiál má velký přínos pro budování zemních těles z hlediska urychlení sedání násypů pro svou nízkou objemovou hmotnost.

Práce by mohla být rozšířena o výpočet sedání pomocí geotechnického softwaru PLAXIS a doplněna inženýrskogeologickým průzkumem pro danou realizovanou vylehčenou zemní konstrukci.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce paní Ing. Barbaře Luňáčkové, Ph.D. za pozornost, kterou věnovala mé práci a za odborné rady.

Dále bych chtěl poděkovat panu doc. RNDr. Františkovi Krestovi, Ph.D. z firmy ARCADIS za poskytnutí informací a materiálů při vyhotovení této bakalářské práce.

## Seznam použitých pramenů

- [1] *Vylehčené násypy pozemních komunikací: Předmět technických podmínek* [online]. Stavební geologie GEOTECHNIKA, 26. 9. 2008, 1. 10. 2008 [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20198.pdf>
- [2] *Liapor: Základní vlastnosti kameniva* [online]. [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/>
- [3] Cellglas. *Ekobyggportalen* [online]. © Copyright Ekobyggportalen.se [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.ekobyggportalen.se/byggmaterial/cellglas/>
- [4] KRESTA, František. *Druhotné suroviny v dopravním stavitelství*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2890-9.
- [5] Fly ash. *NOACIM* [online]. 2009 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: [http://www.noacim.com/Products/Fly\\_Ash.aspx](http://www.noacim.com/Products/Fly_Ash.aspx)
- [6] O autech. *Auto* [online]. 5. 4. 2014 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/dalnice-polystyrenu-stavi-stejne-pontonovy-most-80539>
- [7] *Zpravodajství, dopravní stavby* [online]. 24. 5. 2011 [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://tvstav.cz/clanek/1560-vylehcena-zemni-konstrukce-na-rychlostni-silnici-r6>
- [8] *Lightweight filling materials for road construction*. Oslo, Norway: Norwegian public Road Administration, 2012, č. 100. ISSN 0803-6950. Dostupné z: [http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/190406/1/publikasjon\\_100.pdf](http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/190406/1/publikasjon_100.pdf)
- [9] *HASOPOR, SKUMGLAS* [online]. © 2014 [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://www.hasopor.se/Om-oss.html>
- [10] PAVLICÍK, P. *Využití druhotných surovin v silničním stavitelství*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta Stavební. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.
- [11] Secondary electron image. *New Mexico tech* [online]. 2007 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://geoinfo.nmt.edu/labs/microprobe/description/sem.html>
- [12] IŠTVÁNKOVÁ, VERONIKA. *Využití a aplikace vedlejších energetických produktů (vep) v silničním stavitelství*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební.

- [13] KARLÍN, Petr. *Monitoring sedání násypů dopravních staveb*. Praha, 2013. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.
- [14] O projektování. *HBH projekt* [online]. © 2010–2015 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.hbh.cz/reference/dalnice-d1-stavba-01341-morice-kojetin-2etapa/>
- [15] Alex Kidd, Russ McNeill, Stephen Beales. *Fleming award, A421 improvements: M1 Junction 13 to Bedford, Use of Tyre bales to Form Lightweight Embankment* [prezentace]. 2010 [cit. 2015-03-08].
- [16] New Civil Engineer. *Geotechnical* [online]. © 2002-2015 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.nce.co.uk/features/geotechnical/steady-work-innovative-ideas/8624171.article>
- [17] HERLE, Vítězslav. *Využití VEP v dopravě při stavbě komunikací* [online prezentace]. 2011 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: [http://www.asvep.cz.web3.web4ce.cz/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=9&Itemid=30](http://www.asvep.cz.web3.web4ce.cz/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=9&Itemid=30)
- [18] O projektování. *HBH projekt* [online]. © 2010–2015 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.hbh.cz/reference/dalnice-d1-stavba-0133-vyskov-morice/>
- [19] Fine. *Civil engineering software* [online]. © 2007– 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/vypocet-pomoci-edometrickeho-modulu-01/>
- [20] Fine. *Civil engineering software* [online]. © 2007– 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/vypocet-pomoci-soucinitele-stlacitelnosti-01/>
- [21] New Civil Engineer. *Geotechnical* [online]. © 2002-2015 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.nce.co.uk/features/geotechnical/cutting-edge-leader/8639961.article/>
- [22] Fine. *Civil engineering software* [online]. © 2007– 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/geotechnický-software/>
- [23] Fine. *Civil engineering software* [online]. © 2007– 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/geotechnický-software/sedání/>

## Přílohy

### Seznam obrázků

Obr. 1: Keramické kamenivo, velikost: 0 – 16 mm [2].....	8
Obr. 2: Pěnové sklo, velikost: 10 – 60 mm [3] .....	8
Obr. 3: Balík ze slisovaných pneumatik [4].....	9
Obr. 4: Elektrárenský popílek [5].....	9
Obr. 5: Bloky z polystyrenu [6] .....	9
Obr. 6: Keramické kamenivo Liapor [2].....	10
Obr. 7: Pevnost v tlaku [2] .....	11
Obr. 8: Tepelná vodivost [2] .....	12
Obr. 9: Průběh nasakování a vysychání [2].....	13
Obr. 10: Podkladní násyp na rychlostní komunikaci R6 [7].....	14
Obr. 11: Recyklační proces [8] .....	15
Obr. 12: Pěnové sklo, velikost: 10 – 60 mm [3] .....	16
Obr. 13: Pěnové sklo při opouštění vysokoteplotní pece [9] .....	16
Obr. 14: Násyp pozemní komunikace [8] .....	18
Obr. 15: Balík ze starých slisovaných pneumatik [4] .....	19
Obr. 16: Ukládání balíků starých pneumatik [4].....	20
Obr. 17: Použití bloků starých pneumatik pro stabilizaci svahů po sesuvech [4].....	21
Obr. 18: Ukládání balíků starých pneumatik na silnici A421 [4] .....	21
Obr. 19: Elektrárenský popílek [5].....	23
Obr. 20: Mikroskopický snímek popílku [11].....	23
Obr. 21: Podkladní násyp na rychlostní komunikaci R6 [7].....	24
Obr. 22: Stavba cyklostezky Horní Počaply [12].....	24
Obr. 23: Bloky z polystyrenu [6] .....	25
Obr. 24: Ukládání polystyrenu, dálnice D1 [6].....	25
Obr. 25: Nábřeží se svislými stěnami z EPS bloků, Oslo (Norsko) [8] .....	27
Obr. 26: 1- R6, 2 - No. 17, 3 - A421, 4 - D11, 5 - D1, [7, 8, 14, 17,21] .....	28
Obr. 27: Násyp u přechodové oblasti mostu [7].....	29
Obr. 28: Sanace silnice a sesuvu svahu [8] .....	30
Obr. 29: Model řešení křižovatky M1 a A421 [15].....	31



Obr. 30: Balíky z pneumatik prosypané keramickým kamenivem, silnice A421 [16] .....	32
Obr. 31: Uložení balíků ze starých pneumatik, silnice A421 [16].....	32
Obr. 32: Rozprostření popílku k hrázce [17].....	33
Obr. 33: Doprava popílku na staveniště budoucí dálnice D11 [17].....	33
Obr. 34: Polystyrenové bloky, dálnice D1 [14] .....	34
Obr. 35: Skládání polystyrenových bloku, [14] .....	34
Obr. 36: Přejížděcí oblast mostu a násypu, [14].....	35
Obr. 37: Skladba vylehčené zemní konstrukce .....	36
Obr. 38: Určení edometrického modulu přetvárnosti $E_{oed}$ , [19].....	37
Obr. 39: Spodní část násypu, edometrický modul, .....	40
Obr. 40: Celý násyp – výplň polystyren, edometrický modul .....	41
Obr. 41: Celý násyp – výplň zemina, edometrický modul.....	42

## Seznam tabulek

Tab. 1: Specifikace keramického materiálu [2] .....	11
Tab. 2: Nasákavost [2] .....	13
Tab. 3: Specifikace pěnového skla [8] .....	17
Tab. 4: Parametry bloků vyrobených ze slisovaných starých pneumatik [4].....	20
Tab. 5: Fyzikálně mechanické vlastnosti [4].....	23
Tab. 6: Vlastnosti bloků polystyrenu používaných do vylehčených násypů [1].....	26
Tab. 7: Přípustné zatížení EPS [1] .....	26
Tab. 8: Parametry materiálů použitých při výpočtu sedání.....	37
Tab. 9: Srovnání výsledků ručního výpočtu a GEO5.....	43